



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenl gungsschrift**  
⑩ **DE 100 39 239 A 1**

⑤1 Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**G 01 B 9/02**  
G 01 B 11/30

②1 Aktenzeichen: 100 39 239.3  
②2 Anmeldetag: 11. 8. 2000  
④3 Offenlegungstag: 7. 3. 2002

DE 100 39 239 A 1

⑦1 Anmelder:  
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE  
  
⑦4 Vertreter:  
Jeck · Fleck · Herrmann Patentanwälte, 71665  
Vaihingen

⑦2 Erfinder:  
Lindner, Michael, Dr., 71397 Leutenbach, DE;  
Thominet, Vincent, Echandens, CH

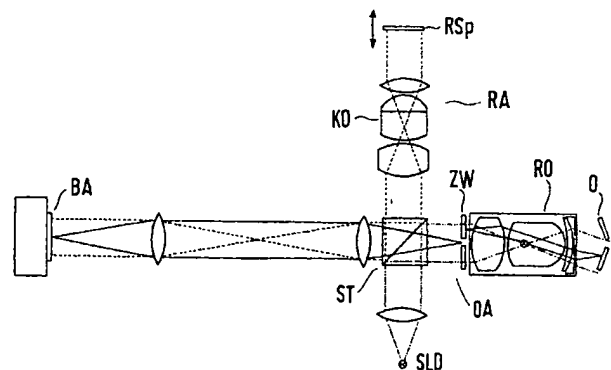
⑤6 Entgegenhaltungen:  
DE 197 21 843 C1  
DE 197 21 842 C2  
DE 196 81 500 C2  
DE 198 08 273 A1  
DE 197 04 602 A1  
DE 44 46 183 A1  
DE 44 46 134 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Optische Messvorrichtung

⑤7 Die Erfindung bezieht sich auf eine optische Messvorrichtung mit einer 3-D-Messeinrichtung zur dreidimensionalen Formvermessung an Oberflächen von Messobjekten (O) und einer eine Objektivoptik aufweisenden Projektionsoptik, wobei das Messobjekt durch eine Lichtquelle (SLD) über einen Beleuchtungsstrahlengang mit einer Beleuchtungsoptik beleuchtet wird. Eine schnelle, hochauflösende Formvermessung von Oberflächen, die nahezu radialsymmetrisch sind, wird dadurch erreicht, dass die Objektivoptik als Bildebnungsoptik zum Erfassen und Ebenen eines gekrümmten Oberflächenbereiches oder als Rundsichtoptik (RO) zum Erfassen eines um 360° umlaufenden radialsymmetrischen Oberflächenbereiches ausgebildet ist (Fig. 2).



DE 100 39 239 A 1

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf eine optische Messvorrichtung mit einer 3-D-Messeinrichtung zur dreidimensionalen Formvermessung an Oberflächen von Messobjekten und einer Objektivoptik aufweisenden Projektionsoptik, wobei das Messobjekt durch eine Lichtquelle über einen Beleuchtungsstrahlengang mit einer Beleuchtungsoptik beleuchtet wird.

[0002] Derartige optische Messvorrichtungen sind z. B. als interferometrische Messvorrichtungen, die auf einer Auswertung von Phase bzw. Laufzeit der Strahlung beruhen, oder als auf dem Triangulationsverfahren beruhende Messvorrichtungen (z. B. Streifenprojektion) bekannt, bei denen die Messung in Abhängigkeit von einem Beobachtungswinkel und der Beleuchtungsrichtung vorgenommen wird.

[0003] Bei den interferometrischen Verfahren sind solche der klassischen Interferometrie (s. z. B. A. Donges, R. Noll in "Lasermesstechnik", Hüthig Verlag 1993), der Weisslichtinterferometrie, bei denen Lichtquellen kurzer Kohärenzlänge (z. B. Leuchtdiode, Superlumineszenzdiode) verwendet werden (vgl. P. de Groot, L. Deck, "Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain" J. Mod. Opt., Vol. 42, No. 2, 389-401, 1995; Th. Dresel, G. Häusler, H. Venzke; "Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar", Appl. Opt., Vol. 31, No. 7, 919-925, 1992; DE 199 48 813.4 und DE 100 15 878.1) und der Heterodyninterferometrie (s. z. B. DE 197 21 842 C2; H. J. Tiziani, "Optical methods for precision measurements", Optical and Quantum Electronics, Vol. 21, 253-282, 1989; K. Creath, "Temporal phase measurement method" in d. W. Robinson, T. G. Reid: Interferogram Analysis IOP Publishing Bristol 1993; R. Onodera, Y. Ishii, "Two-wavelength interferometry that uses a Fourier-transform method", Appl. Opt., Vol. 37, No. 34, 7988-7994, 1998) zu unterscheiden.

[0004] Wie z. B. in den beiden genannten, nicht vorveröffentlichten deutschen Patentanmeldungen 199 48 813.4 und 100 15 878.1 sowie weiterhin auch in den beiden nicht vorveröffentlichten deutschen Patentanmeldungen 100 33 027.4 und 100 33 028.2 erwähnt, die sich ebenfalls mit der Weisslichtinterferometrie befassen, ist es bisher schwierig, größere Flächenbereiche, insbesondere in engen Hohlräumen, schnell und hoch auflösend zu vermessen. Beispielsweise ist es bei Objekten mit sehr kleinen Kegelwinkeln oft nicht möglich, diese mittels Interferometer, die mit einem ebenen Gesichtsfeld arbeiten, zu vermessen, da kein Licht in das Objektiv zurückgestreut wird. Mit einem Endoskop können Kegel- oder Zylinderflächen nur in kleinen Ausschnitten gemessen werden. Die Messungen der gesamten Fläche sind zeitaufwendig, da viele einzelne Ausschnitte gemessen werden müssen.

[0005] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine optische Messvorrichtung der eingangs genannten Art bereit zu stellen, mit der größere zusammenhängende Oberflächenbereiche von Messobjekten schnell und hoch auflösend vermessen werden können.

[0006] Diese Aufgabe wird mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Hiernach ist vorgesehen, dass die Objektivoptik als Bildebnungsoptik zum Erfassen und Ebenen eines gekrümmten Oberflächenbereiches (z. B. Sattelfläche, Kegelsegment) oder als Rundsichtoptik zum Erfassen eines um 360° umlaufenden radialsymmetrischen Oberflächenbereichs ausgebildet ist. Der zu messende Oberflächenbereich, der mit der Beleuchtungsoptik beispielsweise auch an schwer zugänglichen Stellen einfach und definiert beleuchtet wird, wird mit der Rundsichtoptik zusammenhängend

und damit hoch auflösend und schnell erfasst und mit der Messeinrichtung dreidimensional vermessen. Hierbei können Oberflächenungenauigkeiten, z. B. ungewünschte Rauigkeit, ungenaue zylindrische Bohrungen oder kegelförmige Ventilsitze und auch Übergangsbereiche zwischen kegelförmigen Ventilsitzen und zylindrischen Flächen, aber auch nicht nur derartige, sich in Tiefenrichtung erstreckende Oberflächen, sondern auch flache Bereiche ausgemessen werden. Mit der Bildebnungsoptik kann insbesondere ein stark gekrümmter Oberflächenbereich, z. B. ein stark gekrümmter Abschnitt eines Ventilsitzes vermessen werden.

[0007] Die Rundsichtoptik kann vorteilhaft derart ausgebildet sein, dass der erfasste Oberflächenbereich als (nicht unbedingt ebenes) Zwischenbild abgebildet wird.

[0008] Für die weitere Messwerterfassung und -auswertung ist es günstig, dass die Rundsichtoptik oder Bildebnungsoptik derart ausgebildet ist, dass der erfasste Oberflächenbereich in einer Ebene als geebnetes Bild direkt auf dem Bildaufnehmer oder als geebnetes Zwischenbild abgebildet wird.

[0009] Eine einfache und dabei genaue und schnelle Messung wird dadurch unterstützt, dass die Beleuchtungsoptik, die die Rundsichtoptik oder die Bildebnungsoptik und weitere Optiken enthält, derart ausgebildet ist, dass die das Messobjekt beleuchtende Wellenfront an die Geometrie des Oberflächenbereichs angepasst ist, so dass die Beleuchtungsstrahlen senkrecht auf den Oberflächenbereich auftreffen.

[0010] Alternative vorteilhafte Ausgestaltungen bestehen darin, dass die Rundsichtoptik oder die Bildebnungsoptik entsprechend einem Weitwinkelobjektiv mit einer Winkelvergrößerung wesentlich größer als Eins und als telezentrische Anordnung ausgestaltet ist oder dass die Rundsichtoptik oder die Bildebnungsoptik als Normalobjektiv mit einer Winkel- und Linearvergrößerung von Eins und einer Ablenkungsanordnung ausgebildet ist. Bei der Weitwinkeloptik mit telezentrischer Anordnung kann die Aperturblende außerhalb der Rundsichtoptik liegen, und objektseitig kann jeder Strahl eine andere Pupille besitzen. Dadurch werden die parallelen Strahlen der bildseitigen Seite auf der objektseitigen Seite in Strahlen umgewandelt, die senkrecht auf z. B. einer Kegelfläche (oder Zylinderfläche) sind.

[0011] Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung besteht darin, dass die Ablenkungsanordnung als Axicon ausgebildet ist, das als ein rotationssymmetrisches Prisma oder ein rotationssymmetrischer Spiegel ausgelegt ist. Zur Auslegung von Axicons an sich wird auf J. H. Moleod, "Axicons and their uses", J. Opt Soc Am., Vol. 50, No. 2, 166-169, 1960 sowie auf G. Schröder, "Technische Photographie", Vogel-Verlag, 74-77, 1981 verwiesen.

[0012] Verschiedene geeignete Gestaltungsmöglichkeiten der Rundsichtoptik oder der Bildebnungsoptik bestehen darin, dass die Rundsichtoptik oder die Bildebnungsoptik mit sphärischen, asphärischen oder Grin-Linsen, Stablinen, mit diffraktiven optischen Elementen, Prismen, Spiegeln oder mit einer Kombination aus einem Teil oder allen diesen Komponenten gestaltet ist.

[0013] Alternative vorteilhafte Möglichkeiten für den Aufbau bestehen weiterhin darin, dass die 3-D-Messeinrichtung als eine interferometrische Messeinrichtung oder als eine auf dem Triangulationsverfahren beruhende Messeinrichtung ausgebildet ist, und weiterhin darin, dass die interferometrische Messeinrichtung als an sich bekanntes normales Interferometer, Heterodyninterferometer oder Weisslichtinterferometer, das eine kurzkohärente Lichtquelle aufweist, ausgebildet ist.

[0014] Vorteilhafte Maßnahmen zur Anordnung der Messvorrichtung bezüglich des Objektes und zur Durchführung

der Messung ergeben sich dadurch, dass das Weisslichtinterferometer einen Objekttarm, in dem die Rundsihtoptik oder die Bildebnungsoptik angeordnet ist und über den zumindest teilweise der Beleuchtungsstrahlengang verläuft, und einen Referenzarm mit einem Referenzspiegel aufweist und dass der Referenzarm und der Objekttarm sich voneinander räumlich getrennt erstrecken oder räumlich ineinander in einer Common-Path-Anordnung integriert sind. Ist dabei vorgesehen, dass das Weisslichtinterferometer in ein Modulationsinterferometer und ein daran über eine Faseroptik oder eine Freistrahl-optik angekoppeltes Sondeninterferometer mit der Rundsihtoptik unterteilt ist, so wird die Handhabung weiterhin begünstigt.

[0015] Zur Kompensation der Rundsihtoptik bzw. der Bildebnungsoptik kann im Referenzarm eine der Rundsihtoptik bzw. der Bildebnungsoptik ähnliche oder entsprechende Optik eingesetzt werden.

[0016] Verschiedene Ausgestaltungsmöglichkeiten, die je nach Messaufgabe unterschiedliche Vorteile haben und geeignet gewählt werden können, ergeben sich dadurch, dass eine relative Änderung der optischen Weglänge zwischen Objektlichtweg und Referenzlichtweg bei dem Weisslichtinterferometer auf unterschiedliche Arten erfolgen kann, z. B. durch Bewegen eines Referenzspiegels, durch Bewegen des Objektes, durch Bewegen des Interferometers, durch Änderung der optischen Weglänge im Referenzarm mittels eines akustooptischen Modulators oder durch Tiefenabtastung des Zwischenbildes.

[0017] Unter Verwendung der Rundsihtoptik oder der Bildebnungsoptik wird die Oberfläche des Objektes nahezu senkrecht beleuchtet und beobachtet, so dass insbesondere auch bei sehr kleinen Kegelwinkeln oder in engen Bohrungen gemessen werden kann. Mit der Rundsihtoptik kann das Messobjekt in einer einzigen Aufnahme in einem umlaufenden ringförmigen Ausschnitt oder, je nach Beschaffenheit der Oberfläche, sogar vollständig vermessen werden.

[0018] Die Rundsihtoptik oder die Bildebnungsoptik kann dabei so gestaltet sein, dass die Oberfläche des Objektes direkt, über eine telezentrische Abbildung oder ein Zwischenbild (gemäß der deutschen Patentanmeldung 199 48 813.4-52) auf den Bildaufnehmer abgebildet wird.

[0019] Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

[0020] Fig. 1A bis 1D verschiedene Ausbildungsformen für eine Rundsihtoptik einer optischen Messvorrichtung, wobei die Figur auch Messobjekte mit verschiedenen Oberflächenbereichen zeigen,

[0021] Fig. 2 eine als Weisslichtinterferometer ausgebildete optische Messvorrichtung mit einer Rundsihtoptik nach Fig. 1A und einem geebneten Zwischenbild,

[0022] Fig. 3 eine weitere Ausführungsform der optischen Messvorrichtung, bei der gegenüber der Fig. 2 ein weiteres Zwischenbild erzeugt wird,

[0023] Fig. 4 eine weitere optische Messvorrichtung in Form eines Weisslichtinterferometers, bei dem gegenüber Fig. 2 der Referenzarm abgeändert ist,

[0024] Fig. 5 eine weitere Ausführungsform der optischen Messvorrichtung mit einem Weisslichtinterferometer, bei dem die bei der Tiefenabtastung bewegten Teile (strichliert dargestellt) gegenüber den vorhergehenden Ausführungsbeispielen anders zusammengefasst sind,

[0025] Fig. 6 eine Ausführung der optischen Messvorrichtung mit einem Weisslichtinterferometer, bei dem eine Trennung in Modulationsinterferometer und Sondeninterferometer vorgenommen ist und

[0026] Fig. 7 eine weitere Ausführungsform der optischen Messvorrichtung mit einem in ein Modulationsinterferome-

ter und ein Sondeninterferometer aufgeteilten Weisslichtinterferometer, bei dem gegenüber Fig. 6 der Referenzspiegel des Sondeninterferometers unterschiedlich gestaltet ist.

[0027] Die Fig. 1A bis 1D zeigen verschiedene Ausbildungsformen einer Rundsihtoptik RO, die in unterschiedlichen Aufbauformen der optischen Messvorrichtung eingesetzt werden können, insbesondere auch den in den Fig. 2 bis 7 gezeigten optischen Messvorrichtungen in Form von Weisslichtinterferometern (Kurzkoherenzinterferometern).

[0028] Wie Fig. 2 zeigt, wird eine für die Messaufgabe geeignet ausgebildete Rundsihtoptik RO in einem Objekttarm OA vor einem Messobjekt O bzw. dessen zu vermessenden Oberflächenbereich angeordnet, der vorliegend z. B. die Fläche eines Innenkegels darstellt. Entsprechend kann die Rundsihtoptik RO auch auf die Außenfläche eines Kegels gemäß Fig. 1B oder auf die Innenfläche eines Innenzylinders bzw. einer Bohrung gemäß Fig. 1C oder einen Übergangsbereich zwischen einer Kegelfläche und einer Bohrung gemäß Fig. 1D ausgelegt sein. Die Rundsihtoptik RO kann dabei z. B. ein Objektiv sein, das ähnlich wie ein Weitwinkelobjektiv ausgebildet ist (Winkelvergrößerung stark unterschiedlich von 1) und dabei nahezu als eine telezentrische Anordnung realisiert ist. Die Aperturblende kann außerhalb der Rundsihtoptik RO liegen, und objektseitig kann jeder Strahl eine andere Pupille besitzen. Dadurch werden die parallelen Strahlen der bildseitigen Seite auf der objektseitigen Seite in Strahlen umgewandelt, die senkrecht auf z. B. einer Kegelfläche (oder Zylinderfläche) stehen. Alternativ kann z. B. auch ein klassisches Objektiv verwendet werden, mit einer Winkel- sowie Linearvergrößerung von 1, jedoch mit einem Ablenkungssystem, z. B. einem Axicon. Das Axicon kann entweder ein rotationssymmetrisches Prisma sein, das in Transmission arbeitet, oder ein rotationssymmetrischer Spiegel, der in Reflexion arbeitet. Die Rundsihtoptik RO kann entweder mit sphärischen, asphärischen oder Grin-Linsen, Stablinen, mit diffraktiven optischen Elementen, Prismen, Spiegeln oder einer Kombination daraus realisiert werden. Auch ist ein Aufbau der Rundsihtoptik denkbar, bei dem ein kreisringförmiger oder auch kreisförmiger Ausschnitt einer flachen Fläche beleuchtet und erfasst wird. Die erfassten Oberflächenbereiche sind dabei radialsymmetrisch.

[0029] Außerdem können zwei oder mehr Rundsihtoptiken RO derart angeordnet und ausgelegt sein, dass gleichzeitig außer von einem Oberflächenbereich von mindestens einem weiteren Oberflächenbereich ein geebnetes Bild oder Zwischenbild erzeugbar ist (wie in der deutschen Patentanmeldung 100 33 028.2 angegeben).

[0030] Im Referenzlichtweg kann dann ebenfalls entsprechend der Anzahl der weiteren Oberflächenbereiche zum Erzeugen unterschiedlicher optischer Längen mindestens eine weitere Referenzebene (Referenzspiegel) angeordnet sein (gemäß der deutschen Patentanmeldung 100 33 027.4). Mit dieser Anordnung kann z. B. die Lage der Führungsbohrung zu einem räumlich getrennten Ventilsitz gemessen werden.

[0031] Wird als Messmethode die Weisslichtinterferometrie (Kurzkoherenzinterferometrie) angewandt, kann entsprechend Fig. 2 der Aufbau z. B. als Michelson-Interferometer realisiert werden. Das Licht einer kurzkoherenten Lichtquelle SLD, z. B. einer Superlumineszenzdiode oder Leuchtdiode, wird über einen Strahlteiler ST in die beiden Interferometerarme in Form des Objekttarmes OA und des Referenzarmes RA eingekoppelt. Die Beleuchtung des Messobjektes O erfolgt durch die Rundsihtoptik RO hindurch. Dabei ist es günstig, wenn die Beleuchtung der Objekt-oberfläche durch eine Wellenfront erfolgt, die an die Geometrie des Messobjektes O angepasst ist. Durch die

Rundsichtoptik RO wird z. B. ein ringförmiger Ausschnitt (360° umlaufend) der Objektoberfläche durch die Rundsichtoptik RO in eine Ebene abgebildet: es entsteht ein geebnetes Zwischenbild ZW. Das geebnete Zwischenbild kann direkt auf einem Bildaufnehmer BA, z. B. einer CCD-Kamera, erzeugt oder auf diesen abgebildet werden oder über weitere Zwischenabbildungen, wie in Fig. 3 gezeigt. Nach der optoelektrischen Wandlung werden die von der Objektoberfläche erhaltenen Signale in einer (nicht gezeigten) Auswerteeinrichtung geeignet ausgewertet.

[0032] Im Referenzarm RA wird die Referenzwelle von dem entsprechend dem Doppelpfeil bewegten Referenzspiegel RSp reflektiert. Zur Kompensation der Rundsichtoptik RO ist in dem Referenzarm RA eine der Rundsichtoptik RO ähnliche oder entsprechende Kompensationsoptik KO eingesetzt, die vorliegend jedoch einen ebenen Referenzspiegel RSp wieder in eine Ebene abbildet. Wird zur Kompensation eine zur Rundsichtoptik RO identische Optik eingesetzt, ist ein Referenzspiegel zu verwenden, der nahezu dieselbe Geometrie aufweist wie die zu messende Objektoberfläche, wie in Fig. 4 gezeigt.

[0033] Auf dem Bildaufnehmer BA wird das überlagerte Bild der Objektoberfläche mit der Referenzwelle aufgenommen.

[0034] Zur Messung erfolgt eine Änderung des Gangunterschieds zwischen den optischen Weglängen im Objektarm OA und Referenzarm RA (Tiefenabtastung, Tiefenscan) wie an sich bekannt (z. B. Scan des Referenzspiegels RSp, Scan des Objektes, Zwischenbildscan gemäß der eingangs genannten deutschen Patentanmeldung 100 15 878.1, Scan durch akustooptische Modulatoren gemäß der DE 197 21 842 C2).

[0035] Im Falle der Weisslichtinterferometrie kann der Tiefenscan bei Verwendung eines ebenen Referenzspiegels RSp (Fig. 2) oder eines an die Geometrie der Objektoberfläche angepassten Referenzspiegels RSp (Fig. 4) durch ein Verschieben nur des Referenzspiegels RSp oder des Referenzspiegels RSp mit der kompensierenden Optik erfolgen, wie in Fig. 4 gezeigt (strichlierter Bereich). Die Rundsichtoptik RO kann auch als sogenannte Bajonettoptik (gemäß der deutschen Patentanmeldung 100 15 878.1) eingesetzt werden. Der Tiefenscan erfolgt dann, indem das geebnete Zwischenbild ZW von einer beweglichen Objektiv-Optik in Tiefenrichtung abgetastet wird, wie Fig. 5 zeigt, wo der bewegte Teil (wie auch in Fig. 4) strichliert dargestellt ist.

[0036] In dem Bild der Objektoberfläche auf dem Bildaufnehmer BA tritt hoher Interferenzkontrast dann auf, wenn der Gangunterschied in beiden Interferenzarmen OA, RA kleiner als die Kohärenzlänge ist. Zur Gewinnung des 3D-Höhenprofils der Objektoberfläche haben sich verschiedene Verfahren etabliert, wie der eingangs angegebene Stand der Technik zur Weisslichtinterferometrie zeigt.

[0037] Diese Verfahren beruhen darauf, dass zur Messung die optische Weglänge des Objektlichtweges relativ zu der optischen Weglänge des Referenzlichtweges geändert wird und für jeden Messpunkt das Interferogramm einer Auswertung zugeführt wird.

[0038] In den Aufbau gemäß Fig. 3 ist gegenüber dem Aufbau gemäß Fig. 2 in dem Objektarm OA mittels nicht näher bezeichneter Abbildungselemente ein weiteres Zwischenbild ZW2 erzeugt. Zur Kompensation sind in dem Referenzarm RA entsprechende optische Elemente angeordnet. Weitere nicht näher bezeichnete Abbildungselemente sind zwischen dem Strahlteiler ST und dem Bildaufnehmer BA (wie auch in Fig. 2 und den übrigen Figuren) vorgesehen.

[0039] In einem modifizierten Aufbau gemäß den Fig. 6 und 7 ist das Weisslichtinterferometer als sogenannte "Com-

mon Path"-Anordnung realisiert. Das Weisslichtinterferometer wird wieder mit einer breitbandigen (kurzkohärenten) Lichtquelle SLD beleuchtet. Ein erster Strahlteiler Sp teilt das Licht in zwei Arme auf, die einen ersten und einen zweiten Spiegel Sp1, Sp2 aufweisen. Dieses Teil-Interferometer wird im Weiteren als Modulations-Interferometer MI bezeichnet. Der optische Gangunterschied zwischen den beiden Armen ist größer als die Kohärenzlänge der Lichtquelle SLD.

[0040] Von den beiden Spiegeln Sp1, Sp2 aus wird das reflektierte Licht über den ersten Strahlteiler St1 und einen zweiten Strahlteiler St2 in eine optische Sonde (z. B. Endoskop) eingespeist. Dieses Teil-Interferometer, bestehend aus dem Referenzspiegel RSp und dem Strahlengang zu dem Messobjekt O mit den vorgesehenen optischen Bauelementen wird im Weiteren als Sonden-Interferometer SI bezeichnet. Eine Besonderheit dieses Aufbaus besteht darin, dass sich der Referenzspiegel RSp in der optischen Sonde selbst befindet und an unterschiedlichen Positionen (RSp', RSp'') angeordnet sein kann. Ein Teil des Lichtes wird an diesem Referenzspiegel RSp (bzw. RSp', RSp'') reflektiert, während der andere Teil des Lichtes den zu vermessenden Oberflächenbereich des Messobjekts O beleuchtet. Der Referenzspiegel RSp kann auf einer Planplatte aufgebracht sein oder z. B. auf einem Prisma. Der im Modulations-Interferometer MI vorgegebene Gangunterschied wird im Sonden-Interferometer SI durch entsprechende Anordnung des Referenzspiegels wieder rückgängig gemacht.

[0041] Alternativ kann das Sonden-Interferometer SI auch als Mirau-Interferometer realisiert werden, wie Fig. 7 zeigt. Das Messobjekt O wird mittels der Rundsichtoptik RO, die z. B. an eine kegelförmige Objektoberfläche angepasst ist, gegebenenfalls über Zwischenabbildungen ZW, ZW2, auf den Bildaufnehmer BA abgebildet und mit der Referenzwelle überlagert. Zur Gewinnung der Höheninformation wird der Spiegel Sp2 über den Messbereich gescant. Im Bild des Messobjektes O tritt hoher Interferenzkontrast dann auf, wenn der Gangunterschied zwischen den beiden Spiegeln Sp1 und Sp2 genau dem optischen Gangunterschied zwischen dem Referenzspiegel RSp und dem Messobjekt O ist. Zur Gewinnung des 3D-Höhenprofils werden etablierte Verfahren zur Auswertung der Interferogramme in jedem Bildpunkt verwendet. Dieser Aufbau hat den Vorteil, dass Objekt- und Referenzwelle nahezu die identische Optik durchlaufen, wodurch sich Aberrationen weitgehend kompensieren. Außerdem ist diese Anordnung robuster gegen mechanische Erschütterungen.

[0042] Wie die Fig. 6 und 7 weiter zeigen, erfolgt die Ankopplung des Modulations-Interferometers MI an das Sonden-Interferometer SI über eine Faseroptik FO; stattdessen kann die Ankopplung über eine Freistrahloptik erfolgen.

[0043] Alternativ kann die optische Weglänge im Referenzarm RA auch durch akustooptische Modulatoren geändert (durchgescant) werden (vgl. DE 197 21 842 C2).

[0044] Als weiteres Ausführungsbeispiel kann das Common-Path-Interferometer in Mirau-Anordnung auch ohne Modulations-Interferometer MI verwirklicht werden. Die Lichtquelle SLD kann dann direkt in das Sonden-Interferometer SI eingekoppelt werden, z. B. über den Strahlteiler St2 gemäß Fig. 7. Für den Tiefenscan muss dann der tatsächliche Referenzspiegel gegen den Strahlteiler bewegt werden. In Fig. 7 ist der Referenzspiegel RSp des Sonden-Interferometers SI zwischen der Rundsichtoptik RO und dem Messobjekt O in entsprechend angepasster Form gezeigt und ein dritter Strahlteiler St3 angegeben und in einer Teilskizze vergrößert dargestellt.

[0045] Bei anderen (hier nicht gezeigten) interferometrischen Verfahren (z. B. der klassischen Interferometrie, der

Heterodyn-Interferometrie, der Speckle-Interferometrie) oder ESPI gelten entsprechende Adaptionen für den Tiefenscan bzw. für die Auswertung.

[0046] Entsprechende Aufbauten und Maßnahmen können auch in Verbindung mit einer Bildebnungsoptik ergriffen werden, die lediglich einen Teilausschnitt aus einer gekrümmten Oberfläche aufnimmt, ansonsten aber entsprechend der Rundsichtoptik RO in die Messvorrichtung eingebunden ist.

#### Patentansprüche

1. Optische Messvorrichtung mit einer 3-D-Messeinrichtung zur dreidimensionalen Formvermessung an Oberflächen von Messobjekten (O) und einer Objektivoptik aufweisenden Projektionsoptik, wobei das Messobjekt (O) durch eine Lichtquelle (SLD) über einen Beleuchtungsstrahlengang mit einer Beleuchtungsoptik beleuchtet wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Objektivoptik als Bildebnungsoptik zum Erfassen und Ebenen eines gekrümmten Oberflächenbereichs oder als Rundsichtoptik (RO) zum Erfassen eines um 360° umlaufenden radialsymmetrischen Oberflächenbereichs ausgebildet ist.
2. Messvorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Rundsichtoptik (RO) derart ausgebildet ist, dass der erfasste Oberflächenbereich als Zwischenbild abgebildet wird.
3. Messvorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Rundsichtoptik (RO) oder die Bildebnungsoptik derart ausgebildet ist, dass der erfasste Oberflächenbereich in einer Ebene als gezeichnetes Bild direkt auf einem Bildaufnehmer (BA) oder als gezeichnetes Zwischenbild abgebildet wird.
4. Messvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Beleuchtungsoptik, die die Rundsichtoptik (RO) oder die Bildebnungsoptik und weitere Optiken enthält, derart ausgebildet ist, dass die das Messobjekt (O) beleuchtende Wellenfront an die Geometrie des Oberflächenbereichs angepasst ist, so dass die Beleuchtungsstrahlen senkrecht auf den Oberflächenbereich auftreffen.
5. Messvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Rundsichtoptik (RO) oder die Bildebnungsoptik entsprechend einem Weitwinkelobjektiv ausgebildet ist, mit einer Winkelvergrößerung wesentlich größer als Eins und als telezentrische Anordnung ausgestaltet ist oder dass die Rundsichtoptik (RO) als Normalobjektiv mit einer Winkel- und Linearvergrößerung von Eins und einer Ablenkungsanordnung ausgebildet ist.
6. Messvorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Ablenkungsanordnung als Axicon ausgebildet ist, das als ein rotationssymmetrisches Prisma oder ein rotationssymmetrischer Spiegel ausgelegt ist.
7. Messvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Rundsichtoptik (RO) oder die Bildebnungsoptik mit sphärischen, asphärischen oder Grin-Linsen, Stablinsen, mit diffraktiven optischen Elementen, Prismen, Spiegel oder mit einer Kombination aus einem Teil oder allen diesen Komponenten gestaltet ist.
8. Messvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die 3-D-Messeinrichtung als eine interferometrische Messeinrichtung oder als eine auf dem Triangulationsverfahren

beruhende Messeinrichtung ausgebildet ist.

9. Messvorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die interferometrische Messeinrichtung als an sich bekanntes normales Interferometer, Heterodyninterferometer oder Weisslichtinterferometer, das eine kurzkohärente Lichtquelle (SLD) aufweist, ausgebildet ist.

10. Messvorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass das Weisslichtinterferometer einen Objektarm (OA), in dem die Rundsichtoptik (RO) oder die Bildebnungsoptik angeordnet ist und über den zumindest teilweise der Beleuchtungsstrahlengang verläuft, und einen Referenzarm (RA) mit einem Referenzspiegel (RSp) aufweist und

dass der Referenzarm (RA) und der Objektarm (OA) sich voneinander räumlich getrennt erstrecken oder räumlich ineinander in einer Common-Path-Anordnung integriert sind.

11. Messvorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass in dem Referenzarm (RA) eine der Rundsichtoptik (RO) bzw. der Bildebnungsoptik ähnliche oder entsprechende Optik eingesetzt ist.

12. Messvorrichtung nach Anspruch 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, dass das Weisslichtinterferometer in ein Modulationsinterferometer (MI) und ein daran über eine Faseroptik (FO) oder eine Freistrahl-optik angekoppeltes Sondeninterferometer (SI) mit der Rundsichtoptik (RO) oder der Bildebnungsoptik unterteilt ist.

13. Messvorrichtung nach einem der Ansprüche 9 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass eine relative Änderung der optischen Weglänge zwischen Objektlichtweg und Referenzlichtweg bei dem Weisslichtinterferometer durch Bewegen einer Referenzebene (RSp), durch Bewegen des Objektes, durch Bewegen des Interferometers, durch Änderung der optischen Weglänge im Referenzarm (RA) mittels eines akustooptischen Modulators oder durch Tiefenabtastung des Zwischenbildes (ZW) erfolgt.

14. Messvorrichtung nach einem der Ansprüche 9 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens zwei Rundsichtoptiken (RO) oder Bildebnungsoptiken vorgesehen und derart ausgelegt sind, dass gleichzeitig von mindestens zwei Oberflächenbereichen ein gezeichnetes Bild oder Zwischenbild erzeugbar ist, wobei in dem Referenzarm (RA) eine Referenzebene vorgesehen ist und die Auswertung der Bilder oder der Zwischenbilder zeitlich aufeinander folgend erfolgt oder eine der Anzahl der Rundsichtoptiken (RO) oder Bildebnungsoptiken entsprechende Anzahl von zugeordneten Referenzebenen vorgesehen sind und die Auswertung synchron erfolgt.

---

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

---

- Leerseite -

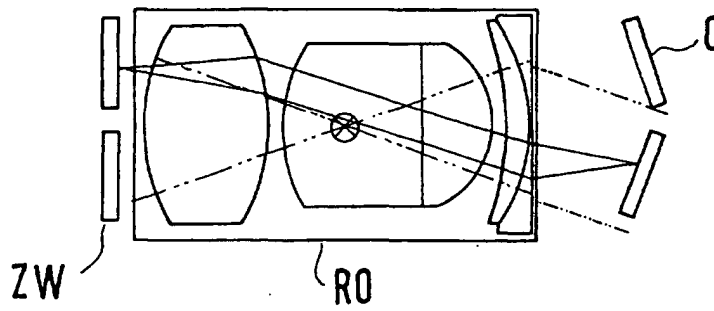


Fig. 1A

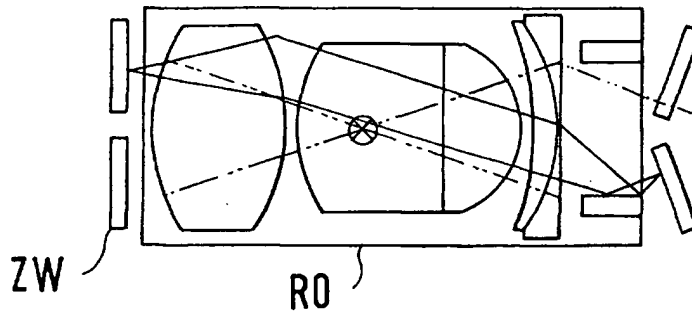


Fig. 1B

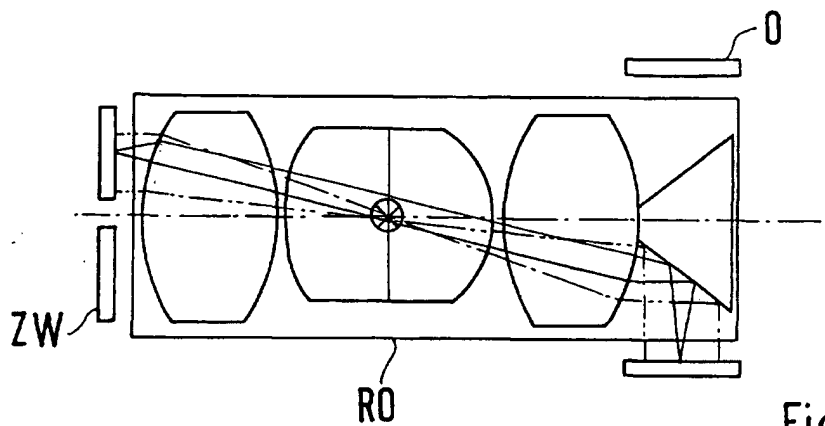


Fig. 1C

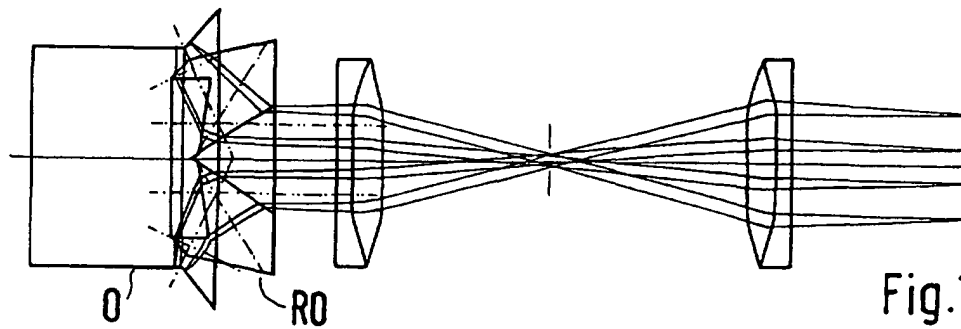


Fig. 1D

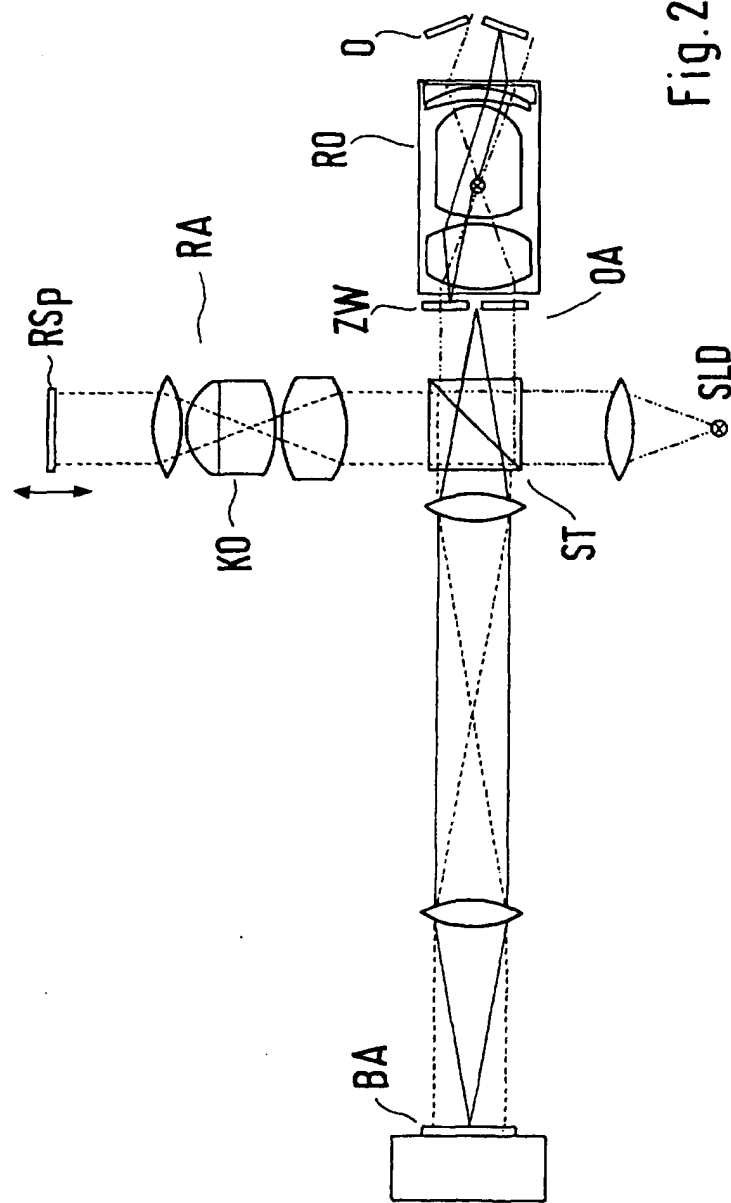


Fig. 2



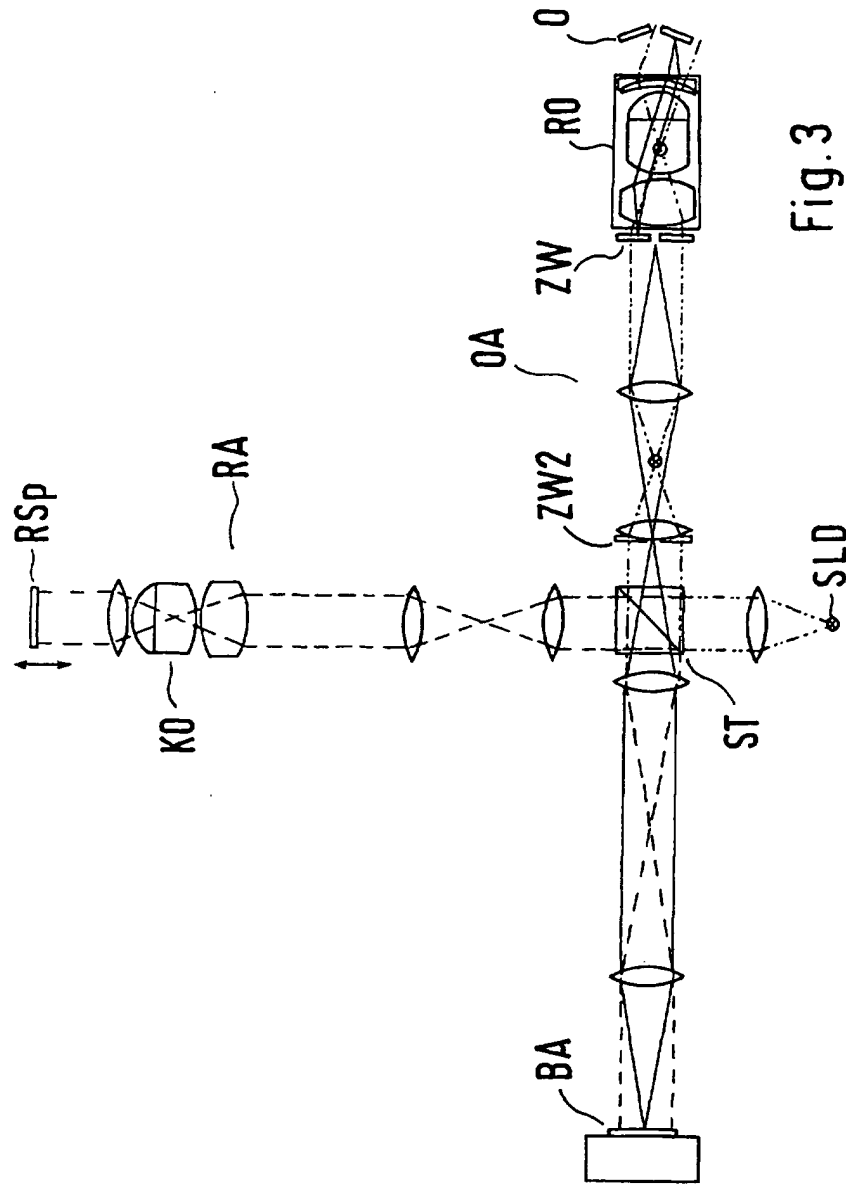
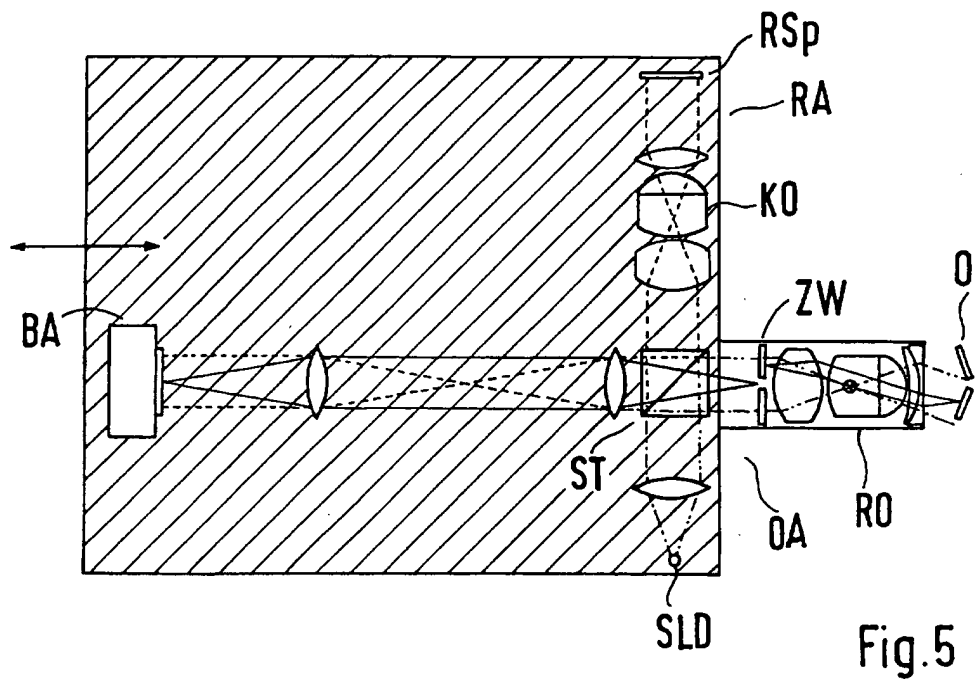
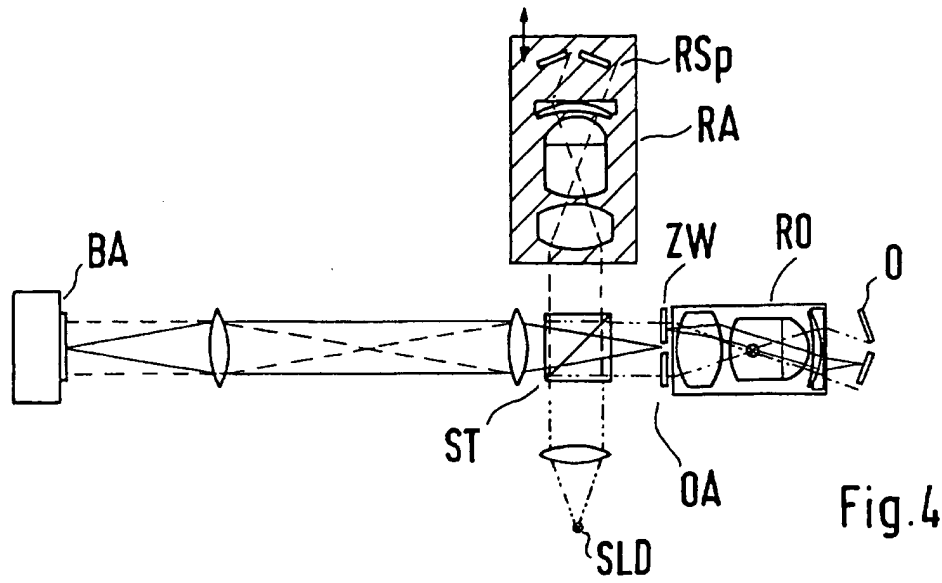
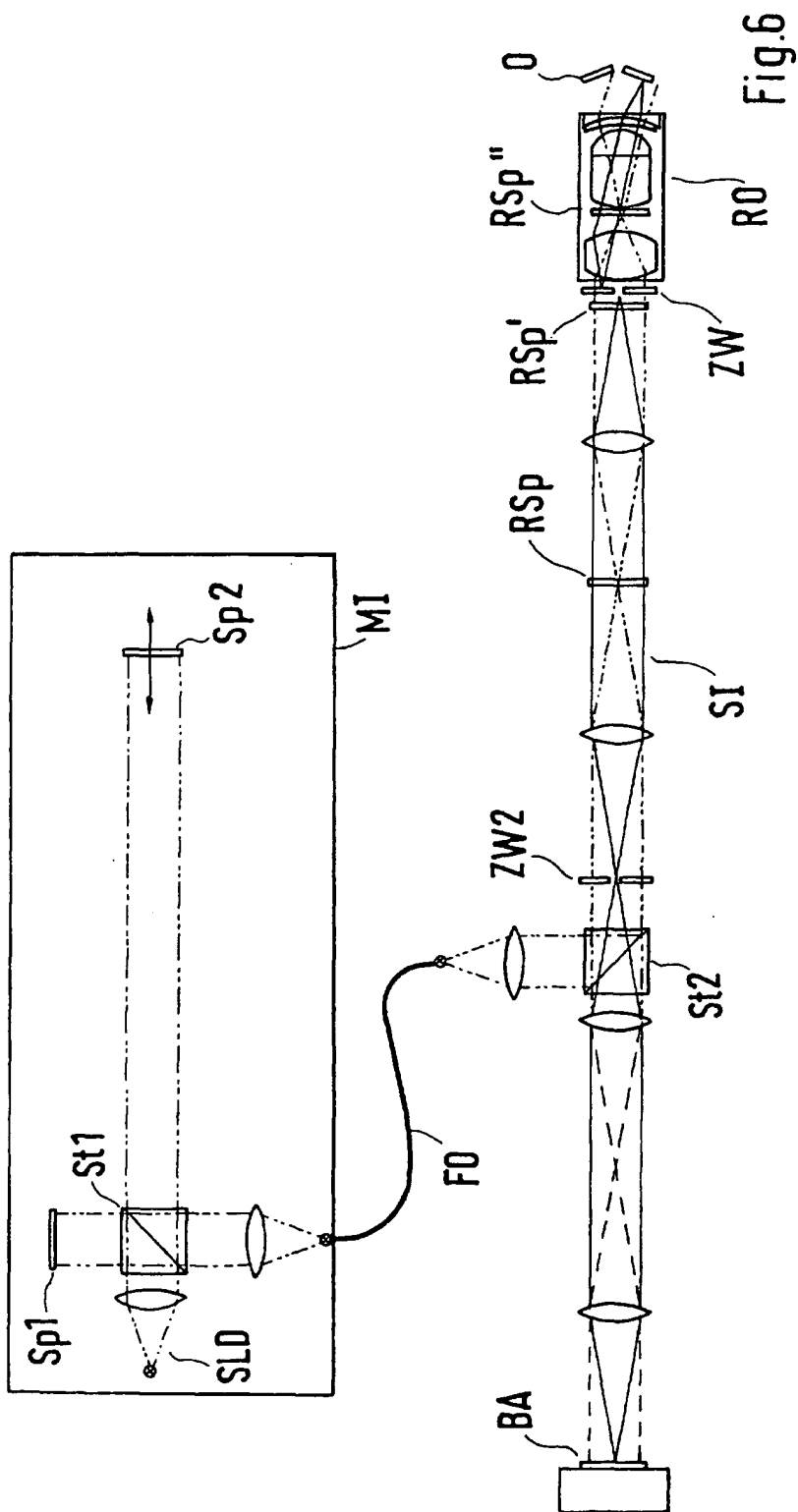


Fig. 3





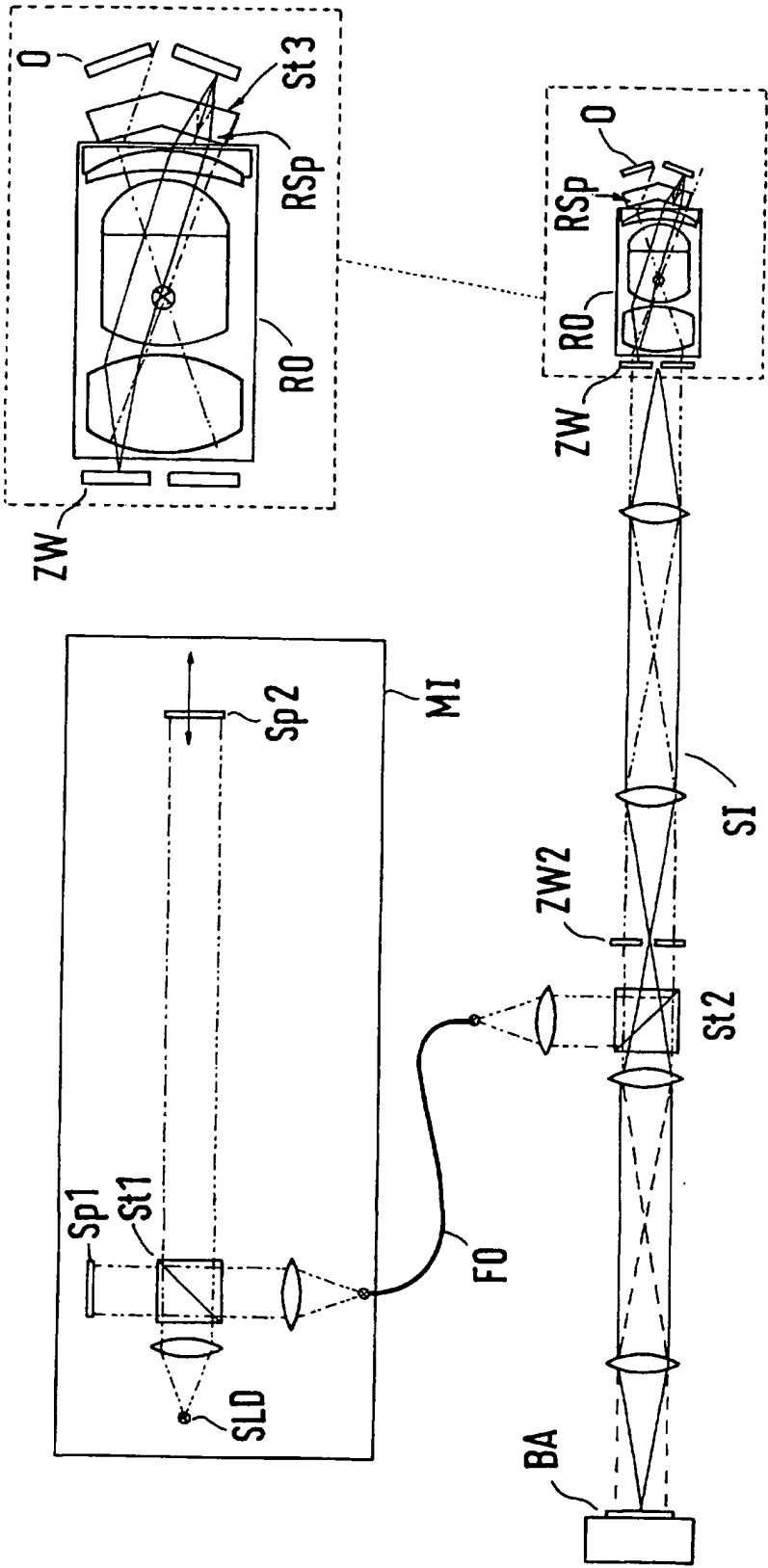


Fig. 7